

ミクロとマクロを結合した粒状体解析モデルの構成に関する研究

著者	金子 賢治
号	2691
発行年	2000
URL	http://hdl.handle.net/10097/7964

氏 名	かね こ けん じ 金 子 賢 治
授 与 学 位	博士（工学）
学 位 授 与 年 月 日	平成 13 年 3 月 26 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）土木工学専攻
学 位 論 文 題 目	ミクロとマクロを結合した粒状体解析モデルの 構成に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 岸野 佑次
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 岸野 佑次 東北大学教授 岩熊哲夫 東北大学教授 風間 基樹

論 文 内 容 要 旨

砂などの地盤材料は非均質で離散的な材料であり，その力学挙動は非常に複雑である．特に，その巨視的全体構造と粒子レベルの微視構造のスケールの差が非常に大きく，全体構造の変形挙動の評価に対して微視的力学特性をどのように取り込むのかということが重要な問題となる．本論文は，微視構造が粒子集合体からなる地盤材料のこのような問題に対して，微視スケールと巨視スケールとを合理的に結びつけ，地盤構造全体の変形挙動予測を可能とするための基礎的な解析モデルの提案を主な目的とするものである．

本論文においては，「数学的均質化理論に基づく粒状体マルチスケール解析法」と「散逸関数に基づく連続体構成モデル」といった異なるアプローチによる2つの粒状体解析モデルを提案し，砂のような非粘着性地盤材料の2軸圧縮試験シミュレーションなどに適用し検証を行った．その結果，提案した2つの粒状体解析モデルは共に新規のアプローチによる解析モデルであり，地盤力学のスケールのギャップを埋め，地盤構造物の変形挙動予測などを微視的変形機構に基づき合理的に行うことのできる基礎的なモデルとなりうるという結論を得た．2つのモデルを導出する過程は微視スケールの挙動を巨視的問題に反映させるための基本的な方法論であり，非均質な微視構造を内在した材料に対して応用可能である．また，論文中には2つの解析モデルを誘導する過程や解析結果などから得られた粒状体，地盤材料の種々の力学情報に関してまとめている．

以下，各章の要点を簡単に述べる．

第1章では，まず，図-1 に示すような地盤の力学において考慮されるべき各スケール，粒子レベルの微視スケール，構成則など「材料」の性質を議論する巨視スケール，「地盤構造物」の巨視的全体構造のスケールについて述べ，各スケールにおける従来の研究をまとめた．さらに，問題点が各スケール間に存在するギャップにあることを指摘し，各スケールを合理的に結合し微視的

変形機構を反映した巨視的挙動を表現するための粒状体解析モデルを構築するといった本論文の目的および位置づけを明確にした。

第2章では、本論文全体に渡って直接的・間接的に基本となり、微視的変形機構の考察のために用いられる粒状要素法に理想的な要素試験シミュレーション解析を行うための周期境界制御法を導入し、その基本的な考え方と解析アルゴリズムについて概説した。また、その解析法の特徴を把握するために解析対象とする粒子数に対する検討と各材料定数の設定に関し数値実験的な考察を行った。粒子数に関しては、対象とする粒子数に対応してある程度の解析誤差が存在するが、200 個程度の粒子数でもばらつきを考慮して誤差 10%以下となることを示した。微視的材料定数である粒子間仮想バネ剛性は巨視的な弾性変形と関係づけられ、粒子間摩擦角は塑性的な変形と関係づけられた。仮想バネ剛性はその大きさと2成分の比がそれぞれ独立に巨視的な見かけのヤング率とポアソン比とに対応させることができること、粒子間摩擦角は応力のピーク値や粒子間すべりが生じる応力状態を変化させるが弾性変形、ダイレイタンシー特性にはほとんど影響しないことなどを指摘した。また、これらの解析例を通して提案手法が粒状体の微視力学を論じる上で有効であることが示された。

第3章では、第2章で述べた粒状要素法を用いて、連続体構成モデルを定式化する際に用いる微視的力学情報を得るための単調載荷、繰り返し載荷、応力プローブ試験の各要素試験シミュレーション解析を行い粒状体の微視的変形機構を考察した。粒状体のエネルギー散逸機構は従来より着目されている粒子間の摩擦すべりによる摩擦エネルギーのみではなく、すべり摩擦に従属して生じる微視構造変化に起因する残留エネルギーも含まれることなどを指摘した。さらに、粒子間のすべりや微視構造変化、粒子運動などの種々の微視的情報を整理したが、特に、ユニットセルの平均的な速度ベクトルと粒子の実際の速度ベクトルとの差により定義される微視速度ベクトルが粒状体の変形を大きく支配していることを指摘し、その定量的なパラメータである変形分散テンソルが摩擦エネルギー、ダイレイタンシー速度と密接に関連するといった知見を得た。また、周期境界制御粒状要素法で得られる解析結果が実際の地盤材料の力学特性と良く適合していることが示された。さらに、応力プローブ試験シミュレーションにより実際の実験では得ることの困難な粒状体構成則に関する各種知見を抽出した。特に、流動則の応力速度方向依存性が観察され、これが Hill の安定条件を満足する方向に生じることを示した。

第4章は本論文の中核をなす章の一つであり、微視構造が非均質な粒子集合により構成される粒状体の微視・巨視連成問題を扱うための粒状体マルチスケール解析法を提案し、その有用性に関する考察を行った。粒状体を連続体とみなした変分不等式による定式を出発点として数学的均質化理論を適用することで、微視的周期構造を含む全体構造は図-2 に示すような等価均質体とユ

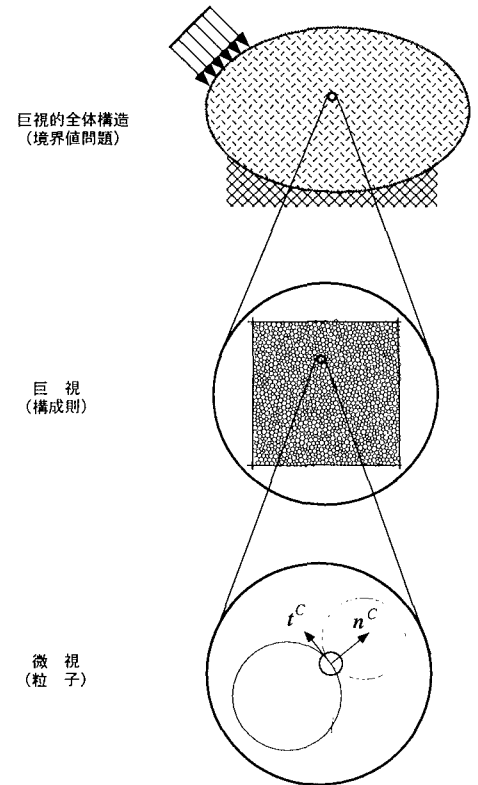


図-1 地盤力学における各スケール

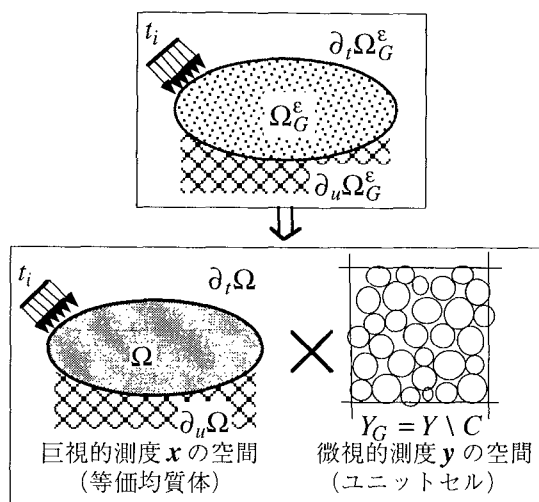


図-2 2つの異なるスケールの空間への分離

成式を用いることなく第3章で示したような微視的変形機構をほぼ全て含み、地盤材料特有の巨視的なダイレイタンシー現象や拘束圧依存性を良く再現できること、それと同時に、全体構造の変形過程における材料内部の粒子の移動・回転や接触力分布等の様々な微視的力学応答を抽出することが可能であることがわかった。したがって、本論文で開発した粒状体マルチスケール解析法は、土質力学が対象とする砂等の粒子集合体の工学的な境界値問題の解法として非常に有用であると結論づけた。ここで提案した粒状体マルチスケール解析法は確固たる数学的背景に基づいて定式化されており、微視スケールおよび巨視的全体構造スケールを合理的に結合した解析手法である。

第5章も第4章と並んで本論文の中核部分の一つであり、第4章とは全く異なるアプローチによる微視的変形機構を反映した粒状体解析モデルを提案した。ここでは微視的な変形機構を反映した連続体的な構成モデルの定式化を行った。本来離散的な材料である粒状体を連続体近似して合理的にその微視的特性をモデルに反映させるためにはエネルギーに着目することが有効である。第3章でも指摘したように粒状体内部の微視的エネルギー散逸機構は、粒子間のすべりによる摩擦エネルギーとそれに伴って生じる残留エネルギーとによるものであるとした。図-3に示すように粒子間のすべり摩擦による摩擦エネルギーによる変形を主散逸ひずみ、残留エネルギーの法線応力速度により生じる成分を従散逸ひずみ、接線応力速度による成分を接線散逸ひずみとして散逸ひずみを合理的に分解した。主散逸ひずみ速度と従散逸ひずみ速度からなる法線散逸ひずみ速度については、散逸関数に基づく構成則理論に従い応力速度との構成関係を導出した。法線散逸ひずみ速度と従散逸ひずみ速度との間に拘束関数を導入し、これを非等方テンソルとし散逸関数も誘導異方性を考慮できる関数形とすることで粒状体の異方的なダイレイタンシー特性を表現

ニットセルとに分解され、それらに対応する巨視および微視スケールの支配方程式が導出される。この結果、微視スケールの支配方程式は、選択されたユニットセル内の粒子運動を反映した変分不等式で記述されるが、その変分不等式と巨視スケールの仮想仕事式を連成させ、巨視的全体構造の解析には通常有限要素法を、微視構造の解析には粒状要素法を用いて両スケールを同時に解く解析アルゴリズムを提示した。さらに、開発した粒状体マルチスケール解析法を2軸圧縮試験シミュレーションに適用することにより、微視構造が粒子集合で構成される全体構造の境界値問題を扱うことを可能とすることを示した。特に、複雑な構

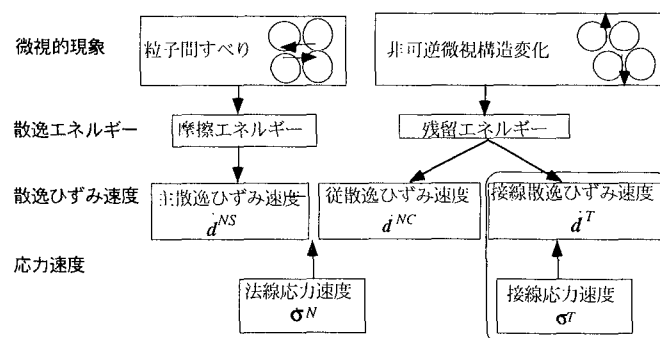


図-3 散逸ひずみ速度の分解

することが可能となった。また、接線散逸ひずみ速度に関しては、粒状要素解析による微視的考察により接線応力速度に比例して生じると仮定し比例係数を Drucker の安定条件を満足させるように定めた。この項を付加することで第 3 章において指摘された流動則の応力速度方向依存性が表現された。このようにして定式化した粒状体の連続体構成モデルの要素試験シミュレーションを行い、粒状要素解析結果と比較し検証した結果、ほぼ全ての載荷経路に対して良く適合した現実的な結果を得た。さらに、応力プローブ試験により、ここで定めた応力速度方向依存型流動則が粒状体の散逸増分応答をより精密に表現可能であることを確認した。したがって、ここで定式化した粒状体の連続体構成モデルは、構成則レベルにおいて粒状要素解析結果を精度良く、詳細に再現可能であり有用な粒状体解析モデルであると結論づけた。

第 6 章では、第 5 章で定式化した連続体構成モデルが工学的な境界値問題に適用可能であることを確認するために有限要素法に導入した。2 軸試験を想定した簡単な境界値問題を解き、第 4 章で示した粒状体マルチスケール解析結果と比較した結果、定式化した連続体構成モデルによる有限要素解析はマルチスケール解析とほぼ同様の結果を得ることができた。したがって、提案した粒状体の連続体構成モデルは工学的にも非常に有用なモデルであることが示された。また、これらの解析結果の比較を通して、本論文で提案した 2 つの粒状体解析モデルについてその特徴などについて整理・検討し、これら 2 つの解析モデルが互いに相補い合うものであることが示された。また、2 つの粒状体解析モデルが微視的変形機構を合理的に反映していて、粒状体の巨視的挙動を定性的に精度良く表現可能であることなど、その有用性について述べ、共通の残された主たる課題として地盤構造全体の破壊現象を統一的に解析できるようにすることを指摘した。

第 7 章は、結論を整理して示した。提案した 2 つの解析モデルは全く異なるアプローチにより導出されるものであり、これらを簡単な境界値問題に適用することで、微視的には粒子集合体からなる材料、特に粒子の堆積体である砂などの挙動を定性的に精度良く解析でき、これらが変形挙動の予測・評価などに対して有効な手法となり得るとの結論を述べた。また、各章で得られた主たる結論と今後解決されるべき問題点や研究の発展性について総括した。

本論文で提案した 2 つの粒状体解析モデルは、微視的変形機構を合理的に反映し微視構造が粒状体からなる全体構造を定性的に精度良く解析できるモデルであり、微視スケールから全体構造までスケールのギャップを合理的に埋めることのできる数少ない力学モデルである。モデルとしての信頼性や説得力を高めるためには実材料との定量的な比較・検証が急務である。また、粒状体の微視的変形機構解明のための粒状要素法と合わせた 3 つのモデルが互いに連携し研究を進めることで、粒状体力学の本質的な目的である微視的観点から地盤材料の物性を見直し巨視的挙動を説明することが達成され则认为している。

論文審査結果の要旨

砂粒などの集合体である粒状体は、地盤材料の主要な構成要素であり、その力学特性の的確な把握は地盤材料の変形特性や破壊メカニズムの解明のために重要である。本論文は、粒状体のもつ微視的な離散性や力学的不均一性を巨視的な力学体系に組み込む方法を確立することが粒状体力学構成のために必要であるという観点から研究を行ったものであり、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、粒状体の材料要素レベルの解析を行うために新たに開発した周期境界制御粒状要素法の提示を行っている。また、種々の設定条件が解析結果に及ぼす影響を調べた応用例が示されている。解析結果より、提案の手法は粒状体の微視力学を論じる上で有効な手段となり得ると認められる。

第3章では、まず、周期境界制御粒状要素法を用いて単調載荷並びに繰り返し載荷シミュレーション試験を実施し、それらの結果が実際の地盤材料のもつ力学特性と良く適合していることが示されている。また、応力プローブシミュレーション試験によって弾塑性増分応答特性の考察を行い、実際の試験ではばらつきのために得ることの困難な力学特性の把握を行うことができることを示している。

第4章では、粒状体の巨視的構造レベルの解析を行うために新たに開発した粒状体マルチスケール解析法と、その2軸圧縮シミュレーション試験への適用例が示されている。この方法は均質化理論を応用して周期境界制御粒状要素法を有限要素法に組込んだものであり、粒子間摩擦角と巨視的内部摩擦角の関係を示すことができるなど、この解析方法の優位性が認められる。

第5章では、粒状体の微視的および巨視的力学特性を結びつけることを可能とする散逸関数に着目し、連続体構成則理論の定式化を行っている。その際、第3章で得られた知見を反映した構成則の誘導を行っている。また、提示した構成則と第3章のシミュレーション試験との定量的適合度を検討した結果を示し、提示した構成則の有用性を示している。

第6章では、第4章で提示した手法による粒状体マルチスケール解析、および第5章で定式化した連続体構成則を組込んだ有限要素解析を用いて同一の境界値問題を解き、解析結果を比較している。解析結果より、提案したマルチスケール解析手法の有用性並びに構成則理論の妥当性が認められる。

第7章は結論である。

以上、要するに本論文は、粒状体の微視的変形挙動を直接的に組込んだ巨視的数値解析手法、並びに、微視的変形メカニズムの考察に基づく連続体としての構成則の提示を行い、これら2種類のアプローチにより実施した同一の境界値問題の解析結果の相互比較をもって両アプローチの有用性を実証したものであり、地盤力学ならびに土木工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。